O TRATAMENTO DE AR COMPRIMIDO COMO FATOR DE REDUÇÃO DE CUSTOS NA INDÚSTRIA

A melhoria contínua da qualidade e da produtividade tem sido objeto de constante atenção por parte de todos os setores da economia e depende de diversos fatores.
Neste contexto, o Tratamento de Ar Comprimido é apresentado como uma oportunidade de evolução e inovação na aplicação da pneumática para empresas de qualquer ramo de atividade, contribuindo para a redução do consumo energético, o aumento da produtividade e a melhoria da qualidade. Além disso, vários processos anteriormente dependentes de outros fluídos encontraram no ar comprimido puro e seco um substituto econômico e seguro.
Neste estudo, veremos como a purificação do ar comprimido representa uma expressiva **vantagem competitiva** aos seus usuários.

1. O AR COMPRIMIDO

ENERGIA

O ar comprimido é uma importante forma de energia, sendo insubstituível em inúmeras aplicações.
Atualmente, cerca de 5 bilhões de toneladas de ar são comprimidas por ano. gerando um consumo de 400 bilhões de kW a um custo de 20 bilhões de dólares.
Nas indústrias em geral, um metro cúbico de ar comprimido custa em torno de meio centavo de dólar (1,0 m³ ar ~ US$ 0,005) apenas em energia, sem falar nos demais custos envolvidos (aquisição do sistema, instalação, operação e manutenção).
Em função das perdas decorrentes da transformação de energia, o ar comprimido (energia pneumática) pode custar de *sete a dez vezes* mais do que a energia elétrica para uma aplicação similar, embora isso seja normalmente compensado pelas vantagens apresentadas pelo ar comprimido.
Portanto, o consumo racional da energia pneumática deve ser uma preocupação constante entre os usuários.
As tabelas a seguir relacionam e quantificam as perdas de energia usualmente verificadas num sistema de ar comprimido:

- **Vazamento de ar comprimido**

Esta tabela apresenta a vazão de ar comprimido através de diferentes diâmetros de orifícios e mostra o custo energético deste problema.

Diâmetro do orifício de vazamento (pol)	1/32″	1/16″	1/8″	1/4″	3/8″
m³/h vazamento	2,72	10,9	44,2	174,0	397,5
US$/ano	65,00	260,00	1.056,00	4.160,00	9.500,00

Considerando: P=7barg / uso=16h/dia – 300 dias/ano (1,0 kWh ~ US$ 0,04)

- **Perda de carga (queda de pressão)**

Além da redução da pressão do ar comprimido provocada por uma rede de distribuição inadequada (diâmetro da tubulação inferior ao necessário, lay-out incorreto da tubulação, curvas e conexões em excesso, etc.), um sistema de ar comprimido também pode estar operando numa pressão muito superior à exigida pela aplicação. Variações na pressão do ar têm um custo elevado.

m³/h	340		800		1700	
ΔP bar (psi)	0,07 (1)	0,14 (2)	0,07 (1)	0,14 (2)	0,07 (1)	0,14 (2)
US$/ano	140,00	280,00	330,00	660,00	700,00	1.400,00

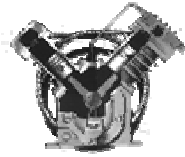
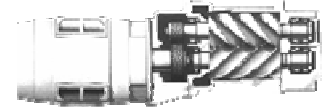
Considerando: P=7barg / uso=16h/dia – 300 dias/ano

- **Temperatura de admissão do ar**

A elevação da temperatura ambiente diminui a densidade do ar, provocando uma redução da massa aspirada pelo compressor. Em conseqüência, a eficiência do compressor fica comprometida.
Sempre que possível, recomenda-se canalizar a tomada de ar do compressor para permitir a sucção de ar ambiente fresco oriundo da parte externa das instalações.
Admite-se que uma redução de 3°C na temperatura de admissão do ar ambiente pelo compressor gera uma economia de energia de 1%.

COMPOSIÇÃO E GERAÇÃO

O ar comprimido é obtido pela compressão do ar ambiente (atmosférico), cuja composição é uma mistura de Oxigênio (~20,5%), Nitrogênio (~79%) e alguns gases mais raros (Argônio, etc.).
O equipamento que realiza a compressão do ar ambiente é denominado *compressor de ar*, que transforma um tipo de energia (normalmente elétrica) em energia pneumática.
Há dois tipos básicos de compressores: alternativos (de pistão) e rotativos (de parafuso e centrífugo).

Os compressores de pistão são comumente aplicados para pequenas/médias vazões (até 200 m³/h).

Os compressores de parafuso são mais indicados para médias e grandes vazões (150 m³/h a 2000 m³/h).

Os compressores centrífugos são mais indicados para vazões grandes e muito grandes (> 1500 m³/h).

As pressões atingidas pelos compressores variam, em geral, entre 6 barg e 40 barg, sendo a pressão de 7 barg tipicamente encontrada na maioria das aplicações.
Hoje, existem cerca de 40 milhões de compressores em operação no mundo e outros 4 milhões são fabricados todos os anos.
Um eficiente sistema de ar comprimido começa pela escolha do compressor mais adequado para cada atividade.

CONTAMINAÇÃO

A contaminação do ar comprimido é a *soma* da contaminação do ar ambiente (poluição) com outras substâncias que são introduzidas durante o processo de compressão.
A poluição do ar ambiente é composta por partículas sólidas (poeira, microrganismos, etc.), vapor d'água (umidade relativa), vapores de hidrocarbonetos (fumaça de óleo diesel, etc.), dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxido nitroso, dióxido de enxofre, etc.
Durante o processo de compressão, o ar comprimido também é contaminado pelo óleo lubrificante do compressor e por partículas sólidas provenientes do desgaste das peças móveis do mesmo.
Já na tubulação de distribuição, o ar comprimido ainda pode arrastar ferrugem e outras partículas.
A norma ISO-8573[1] classifica os contaminantes do ar comprimido e suas unidades de medida da seguinte maneira:

CONTAMINANTE	Dimensão	Concentração	Ponto de orvalho
Sólidos	µm	mg/m³	-x-
Água	-x-	-x-	°C
Óleo	-x-	mg/m³	-x-

A pressão e a temperatura do ar comprimido potencializam os efeitos danosos de todos esses contaminantes em conjunto.
A redução gradual da temperatura do ar comprimido ao longo da tubulação causa a condensação de alguns contaminantes gasosos.
Ao atingirem a fase líqüida (condensado), esses contaminantes estarão presentes no fluxo de ar comprimido sob diferentes aspectos, desde um conjunto amorfo (filete de condensado) depositado nas partes inferiores da tubulação e dos equipamentos, passando por pequenas gotas e chegando até a aerossóis microscópicos dispersos entre as moléculas do ar comprimido.
Por definição (ISO-8573/2.4), aerossol é uma *suspensão num meio gasoso de partículas sólidas e/ou líquidas com uma desprezível velocidade de queda (< 0,25 m/s).*
O resultado da mistura de todos os contaminantes é uma emulsão ácida e abrasiva que compromete o correto funcionamento de um sistema de ar comprimido em qualquer tipo de aplicação.

[1] Este documento utiliza a 1ª edição da Norma ISO-8573 (1991)

Se fizermos uma análise do ar ambiente numa região industrial típica, encontraremos as seguintes taxas aproximadas de contaminação, considerando-se uma temperatura ambiente de 38 ºC e umidade relativa de 100%:

CONTAMINANTE	Dimensão	Concentração
Sólidos	0,01 a 2,0 μm	10^{20} partículas/m³
Água	-x-	46,3 g/m³
Óleo	-x-	15 mg/m³

Esses contaminantes serão aspirados por qualquer compressor de ar, *seja lubrificado ou isento de óleo*, juntamente com os gases citados anteriormente.
A título de ilustração, tomemos um sistema de ar comprimido com um compressor de 5100 m³/h operando em três turnos. Num ambiente sob temperatura de 25°C e umidade relativa de 75%, este compressor introduzirá 2106 litros de água por dia no sistema.

2. PORQUE TRATAR O AR COMPRIMIDO

PREJUÍZOS CAUSADOS PELA CONTAMINAÇÃO

Determinar a ordem de grandeza dos prejuízos causados pela contaminação do ar comprimido não é simples, embora o impacto desses danos seja facilmente percebido pelos usuários.
Esses prejuízos dependem de diversos fatores, mas a aplicação do ar comprimido é determinante nesta análise.
Há certos tipos de indústrias e serviços que sequer iniciam suas atividades sem um sistema de tratamento de ar comprimido.
Genericamente, pode-se classificar esses prejuízos em quatro categorias:

1. **Energético**:
   É o desperdício de energia causado pela ineficiência de um sistema contaminado. Isso se traduz em purgadores que poderiam ser eliminados; propriedades termodinâmicas inferiores do ar comprimido que contém líqüidos e sólidos; etc.
   - Um único purgador temporizado incorretamente regulado ou purgadores do tipo termodinâmico podem, por exemplo, consumir até 3500 kW (~4800 hp) de energia por ano.
   - A presença de contaminação sólida e líqüida (incompressíveis) no fluxo de ar reduz a capacidade do ar comprimido realizar trabalho em até 15%, chegando a 30% em casos extremos.
2. **Manutenção**:
   Neste tópico, são contabilizados os custos com a reparação e a substituição de válvulas, cilindros, ferramentas pneumáticas, etc.
   Quanto mais automatizada for uma linha de produção, maiores serão esses custos.
3. **Paradas de produção**:
   Calcula-se esse prejuízo levando-se em conta itens como o volume de produção desperdiçado até que a falha causada pela contaminação do ar seja eliminada; as horas de mão-de-obra produtiva ociosa; etc.
   Esse custo também é proporcional ao nível de automação do usuário e/ou à importância do ar comprimido no seu processo.
   - Uma empresa de corte de chapas metálicas a plasma interrompe por completo suas atividades caso haja a presença de umidade e óleo no ar comprimido.
4. **Qualidade/Garantia**:
   Nesta categoria, estão inseridos os custos de retrabalho ou perda total de peças e serviços rejeitados pelo controle de qualidade.
   Também devem ser incluídas as despesas com a garantia de produtos e serviços defeituosos.

Em todas essas situações, a **imagem** das empresas será afetada negativamente, mas este prejuízo não será objeto deste trabalho.
A tabela a seguir representa os valores médios* da soma destes quatro prejuízos em função da aplicação do ar comprimido. Quanto mais crítica for a aplicação, maior será esse valor.

TABELA 1 – CUSTO DA CONTAMINAÇÃO

	APLICAÇÃO TÍPICA	US$/m³
I	Limpeza de peças e ferramentas; Proteção individual p/ a automação pneumática	0,00008
II	Acabamento de itens não críticos; Ferramentas pneumáticas	0,0002
III	Jateamento; Pintura; Prótese odontológica, etc.	0,0012
IV	Indústrias Têxtil, Plástica, Metalúrgica, Mecânica, Recapagem de pneus e similares	0,0045
V	Indústrias Automobilísticas, Papel e Celulose, Instrumentação, etc.	0,0045
VI	Hospitais e Indústrias Alimentícias, Químicas e Farmacêuticas	0,015
VII	Processamento de materiais higroscópicos; Exposição do ar a temperaturas abaixo de zero °C	0,05
VIII	Indústrias Eletrônica, Nuclear, Siderúrgica, Gravação de CD's, Processamento de filmes, etc.	0,71

*calculados a partir do estudo de casos reais. Esses valores estão inseridos no *intervalo de confiança* da gaussiana correspondente.

A contaminação do ar comprimido também pode ser analisada sob uma outra ótica, diferente deste raciocínio que considera apenas os prejuízos.
Na verdade, há inúmeras aplicações que utilizam gases secos ou inertes e que poderiam ser facilmente substituídos por ar comprimido puro e seco, como: vulcanização (auto-claves); pressurização de tanques com substâncias higroscópicas ou reagentes à água; acionamento mecânico de dispositivos hospitalares (respiradores, bombas peristálticas, etc.).
Nestas situações, o usuário obtém as melhores taxas de retorno sobre o investimento em tratamento de ar comprimido.

3. COMO TRATAR O AR COMPRIMIDO

CLASSES DE QUALIDADE

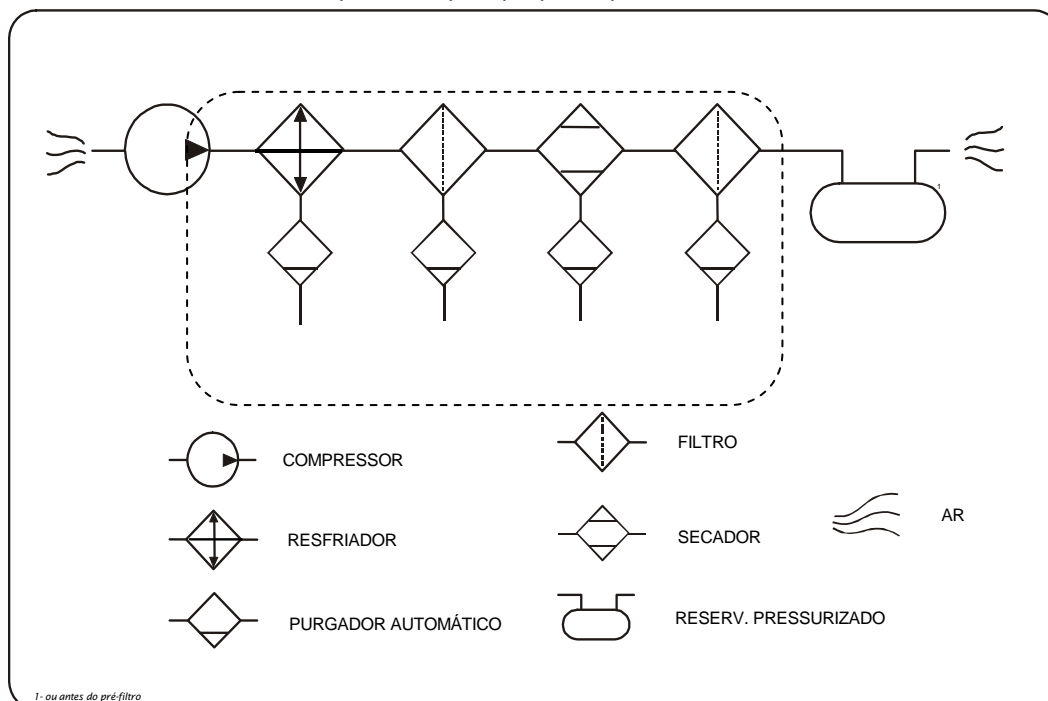
A configuração de um sistema de tratamento de ar comprimido depende do nível de qualidade (pureza) que se deseja atingir.
A tabela abaixo apresenta uma padronização das classes de qualidade do ar comprimido conforme a norma ISO-8573:

Classe de Qualidade	Sólidos Dimensão máxima da partícula (µm)	Água Ponto de Orvalho (°C) Umidade Absoluta (gH_2O/m^3ar)	Óleo concentração residual (mg/m^3)
1	0,1	-70 $2,789x10^{-3}$	0,01
2	1	-40 0,1192	0,1
3	5	-20 0,8835	1
4	15	+3 5,952	5
5	40	+7 7,756	25
6	-x-	+10 9,405	-x-
7	-x-	Não especificado	-x-

A tabela original contém uma coluna p/ a concentração dos contaminantes sólidos.

Assim, se desejarmos especificar a qualidade do ar comprimido que contenha partículas sólidas com no máximo 1µm, ponto de orvalho de –20 ºC e concentração residual de óleo de 0,01 mg/m³, basta informar da seguinte maneira:
Ar comprimido de qualidade ISO-8573, classe 2.3.1

O SISTEMA DE TRATAMENTO DE AR COMPRIMIDO

A seguir, temos um sistema de ar comprimido típico proposto pela norma ISO-8573:

O fluxograma acima é uma simplificação do original. Os símbolos estão de acordo com a norma ISO-1219

O CUSTO DO TRATAMENTO DE AR COMPRIMIDO

A seguinte tabela especifica os diferentes custos para se tratar o ar comprimido em função do nível de pureza (classe de qualidade) desejado.

Nesse cálculo, foram devidamente contabilizados os custos de instalação (mão-de-obra e materiais), operação (mão-de-obra, energia, filtros, etc.), manutenção (preventiva e corretiva) e depreciação do sistema (10~15 anos).

TABELA 2 – CUSTO DO TRATAMENTO DE AR COMPRIMIDO	
ISO-8573, classe:	**US$/m³**
1.7.1	0,000026
1.4.1	0,00031
1.2.1	0,0009

A ECONOMIA PROPORCIONADA PELO TRATAMENTO DE AR COMPRIMIDO

Da fusão das tabelas 1 e 2, podemos concluir que um sistema de tratamento de ar comprimido corretamente especificado, instalado, operado e mantido resultará numa economia bastante significativa ao usuário, justificando plenamente seu investimento.

Instalações típicas	*ISO-8573 classe*	*Aplicações*	*Economia proporcionada pelo Tratamento* US$/m³*
FILTRO M40 / FILTRO M20	1.7.1	*Uso geral; proteção localizada de válvulas, cilindros, sopragem, pintura, ferramentas pneumáticas, automação, jateamento, etc. Como o ar não está seco neste sistema, recomenda-se um certo cuidado na sua aplicação.*	*0,00006*
FILTRO M20	1.7.1	*O ar comprimido está seco nesse arranjo, com ponto-de-orvalho médio entre 5ºC e 15ºC. É ideal p/ pequenas vazões (até 15 pcm) em aplicações de ponto-de-uso: pintura, jateamento, odontologia, etc.*	*0,0012*
FILTRO M40 / SECADOR POR REFRIGERAÇÃO / FILTRO M20* (energy plus)	1.4.1	*Esta combinação compõe o sistema de tratamento mais largamente utilizado na indústria. Em função de seu abrangente nível de proteção, atende diversos setores, como o automobilístico, plástico, têxtil, papel e celulose, mecânico e metalúrgico, etc. Veja também o synergy*	*0,0042*
FILTRO MA	1.4.1	*Qualidade similar ao sistema anterior, porém com eliminação de odores e um menor residual de óleo(0,003 mg/m³), importante em geração de O_2 e N_2, inalação sem eliminação de CO e CO_2, indústrias alimentícias, químicas, farmacêuticas, etc.*	*0,015*
FILTRO M40 / FILTRO M20* / SECADOR POR ADSORÇÃO / FILTRO M40	2.2.1 2.1.1	*Utilizado quando o ar comprimido entra em contato com produtos higroscópicos (cimento, leite em pó, resinas, liofilizados, pastilhas efervecentes, etc.), devido ao risco de absorção do vapor d'água e também quando for submetido a baixas temperaturas, devido ao risco de congelamento.*	*0,05*
FILTRO M20	1.2.1 1.1.1	*A combinação de um baixíssimo ponto de orvalho com retenção máxima de particulados é fundamental em aplicações como a fabricação de fibras óticas, circuitos integrados, compact discs, processamento de filmes, instrumentação crítica, siderurgia, reatores nucleares, etc.*	*0,70*

COMPRESSOR ROTATIVO (parafuso, etc.) — COMPRESSOR ALTERNATIVO (pistão) nota 2 — RESFRIADOR POSTERIOR — nota 3 — synergy classe 1.4.1

Os compressores de ar mostrados nestas tabelas não fazem parte de um sistema de tratamento de ar comprimido.

Os demais equipamentos (no interior da linha tracejada) compõem exatamente alguns sistemas de tratamento de ar comprimido para uso geral, excluindo-se apenas equipamentos especiais destinados ao tratamento do ar para aplicações específicas, como respiração humana, entre outras.

Nos países desenvolvidos, a maioria dos novos sistemas de ar comprimido já são instalados com seu respectivo tratamento. Essa atitude, porém, ainda não está devidamente consolidada nos países em desenvolvimento.

4. OS COMPONENTES DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO DE AR COMPRIMIDO

O RESFRIADOR-POSTERIOR

Pela seqüência recomendada pela ISO-8573, vemos que há um resfriador-posterior posicionado imediatamente após o compressor.
Sua função é reduzir a temperatura do ar que deixa o compressor para níveis próximos da temperatura ambiente. Com isso, obtém-se uma grande condensação dos contaminantes gasosos, especialmente do vapor d'água.
O separador mecânico de condensados do resfriador-posterior responde pela remoção de ±70% dos vapores condensados do fluxo de ar comprimido.

Um **purgador automático** é geralmente instalado sob o separador de condensados para garantir a eliminação desta contaminação líqüida para a atmosfera, com perda mínima de ar comprimido.

> Os purgadores são pequenos aparatos destinados a efetuar a drenagem dos contaminantes líqüidos do sistema de ar comprimido para o meio-ambiente. Podem ser *manuais* ou *automáticos*, sendo que estes últimos dividem-se normalmente em *eletrônicos* e *mecânicos*. Os purgadores eletrônicos são os mais utilizados na atualidade e são encontrados nos tipos *temporizado* ou com *sensor de umidade*.

Em termos construtivos, o resfriador-posterior é um trocador de calor convencional resfriado pelo ar ambiente ou por água.
Na *especificação* de um resfriador-posterior, deve-se levar em consideração fatores como: vazão, pressão e temperatura máximas admissíveis, perda de carga, normas construtivas, materiais empregados (inoxidáveis ou não), energia consumida, tipo e proteção do motor elétrico (quando aplicável), acessórios disponíveis, peso, dimensões, testes de desempenho e qualidade, entre outros.

O FILTRO DE AR COMPRIMIDO

Pela definição da norma ISO-8573, filtro é um *aparato para separar os contaminantes presentes em um fluído.* (ISO-8573/2.16)
O filtro de ar comprimido aparece geralmente em três posições diferentes: antes e depois do secador de ar comprimido e também junto ao ponto-de-uso.
A função do *filtro instalado antes do secador* por refrigeração (pré-filtro) é separar o restante da contaminação sólida e líqüida (~30%) não totalmente eliminada pelo separador de condensados do resfriador-posterior, protegendo os trocadores de calor do secador contra o excesso de óleo oriundo do compressor de ar, o que poderia impregná-los, prejudicando sua eficiência de troca térmica. (ISO-8573/5.2.3)
O excesso de condensado no secador também reduz sua capacidade de resfriamento do ar comprimido, pois consome-se energia para resfriar um condensado que já poderia ter sido eliminado do sistema.

No caso de sistemas dotados de secadores por adsorção, o pré-filtro deverá garantir que nenhuma quantidade de contaminação líqüida, inclusive os aerossóis de água e óleo, atinja o material adsorvedor, obstruindo seus poros e impedindo a sua reativação. (ISO-8573/5.2.3)

O *filtro instalado após o secador* (pós-filtro) deve ser responsável pela eliminação da umidade residual (~30%) não removida pelo separador mecânico de condensados do secador por refrigeração, além da contenção dos sólidos não retidos no pré-filtro.
A capacidade do pós-filtro efetuar a eliminação de qualquer umidade residual é seriamente afetada pela temperatura do ar comprimido na saída do secador.
Na verdade, em qualquer secador por refrigeração, o ar comprimido sofre um reaquecimento antes de voltar à tubulação. Esse reaquecimento é intencional (economiza energia e evita que a tubulação fique gelada), mas provoca a completa reevaporação da umidade residual que não foi removida pelo separador de condensados. No estado gasoso, essa umidade não pode ser eliminada pelo pós-filtro.
Na prática, o pós-filtro instalado após o secador por refrigeração retém apenas partículas sólidas.
No caso de sistemas dotados de secadores por adsorção, o pós-filtro destina-se apenas à retenção das partículas sólidas produzidas pela abrasão do material adsorvedor (poeira do adsorvedor).

Os filtros instalados no ponto-de-uso são utilizados para evitar que os contaminantes presentes ao longo da tubulação de ar comprimido atinjam a aplicação final do mesmo.
Se o sistema não possui qualquer tipo de tratamento de ar comprimido, os filtros instalados no ponto-de-uso são ainda mais recomendados. (ISO-8573/4.5)

Os modernos filtros para ar comprimido são do tipo *coalescente* e *adsorvedor*.

Esses filtros são constituídos por uma carcaça resistente a pressão do ar comprimido e por um elemento filtrante, que é responsável pela filtração do ar.

Alguns acessórios costumam fazer parte deste equipamento, como um purgador automático e um manômetro indicador da saturação do elemento filtrante (perda de carga).

Os elementos filtrantes são geralmente apresentados em diferentes graus de filtração, utilizados conforme a aplicação do ar comprimido e a posição do filtro no sistema.

Aplicações menos severas, bem como os pré-filtros, exigem elementos com menor capacidade de retenção.

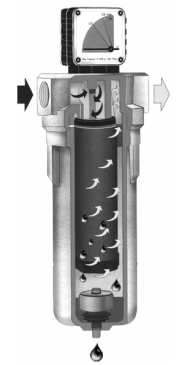
Da mesma forma, aplicações críticas e pós-filtros necessitarão de elementos com maior poder de filtração.

O mecanismo de operação de um filtro coalescente é bastante particular. Baseia-se, na verdade, em dois processos distintos: a retenção mecânica e a coalescência.

A retenção mecânica é a simples obstrução da passagem do contaminante através do elemento, permitindo apenas que o ar comprimido siga adiante. Nesse caso, é fácil notar que o contaminante deverá ser maior do que o menor poro virtual do elemento. Esse processo está contido no primeiro efeito que produz a coalescência (Interceptação Direta), conforme será visto logo a seguir.

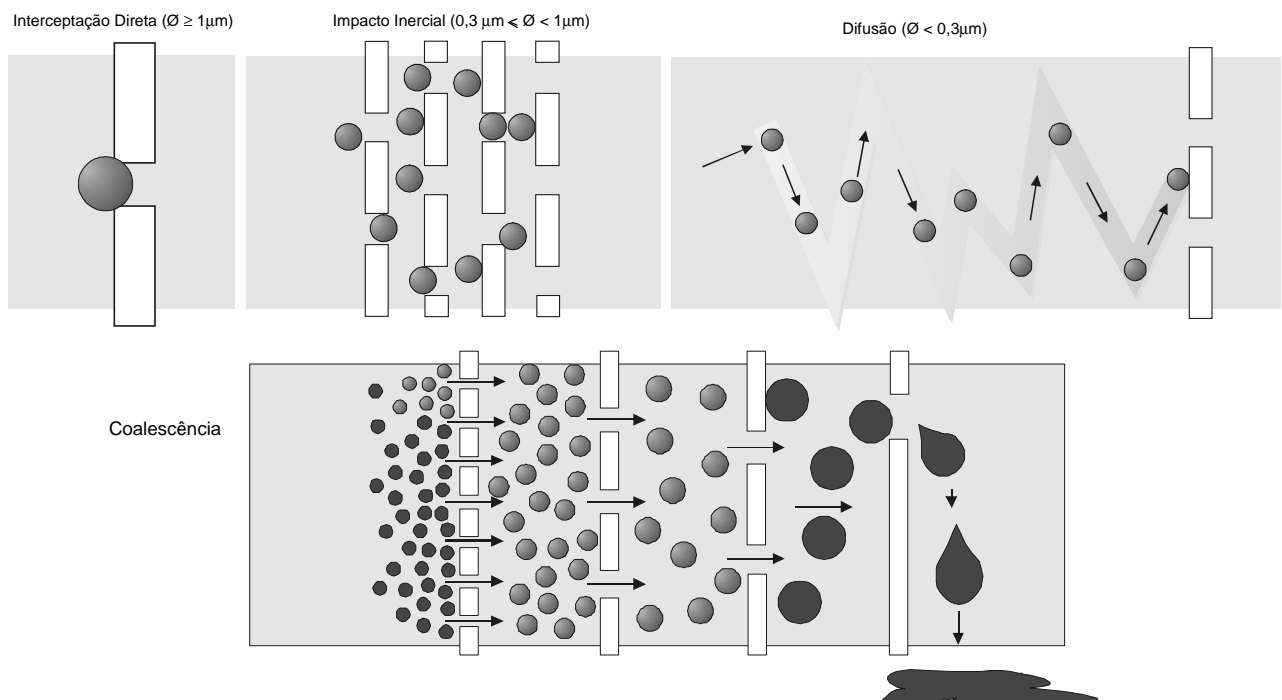
A *coalescência*, porém, é considerada um fenômeno um pouco mais complexo e muitos estudiosos não a vêem como um processo de filtração propriamente dito.

A norma ISO-8573 define a coalescência com bastante precisão como sendo a *ação pela qual partículas líqüidas em suspensão unem-se para formar partículas maiores.*

Como uma parte significativa (~30%) da contaminação líqüida presente no ar comprimido é composta por aerossóis, a coalescência ganhou importância central para a eficiência de um sistema de tratamento de ar comprimido, pois é somente através da coalescência que se consegue separar esses aerossóis.

Três efeitos se somam para produzir a coalescência:

- ***Interceptação Direta*** *(ISO-8573/2.12): efeito de filtração no qual uma gota ou uma partícula sólida colide com um componente de um meio filtrante que está em seu caminho ou é capturada por poros de diâmetros menores do que o diâmetro da gota ou da partícula.*
- ***Impacto Inercial*** (ISO-8573/2.18): *processo no qual uma partícula colide com uma parte do meio filtrante devido à inércia da partícula.*
- ***Difusão*** (ISO-8573/2.11): *movimento (browniano) de moléculas gasosas ou de partículas pequenas causado por uma variação de concentração.*

A *microfibra de borossilicato* é o componente principal do meio filtrante, sendo responsável pela ação coalescente. Essas microfibras são inertes e impermeáveis, o que significa que não reagem quimicamente com outras substâncias e também não adsorvem líqüidos. Também são incombustíveis.

As figuras a seguir representam o fenômeno da coalescência e seus efeitos:

Pode-se observar que a coalescência não impede que a contaminação líqüida atravesse todo o meio filtrante.

Ao contrário, ela permite que isso ocorra para que os contaminantes coalescidos possam dirigir-se ao fundo da carcaça do filtro pela ação da gravidade e sejam drenados para o exterior a partir desse ponto.

Portanto, um elemento coalescente somente poderá ficar saturado pela aglomeração de partículas sólidas no *interior de suas fibras*, ou seja, pelo efeito da retenção mecânica.

A emulsão de óleo e água causa, no máximo, a impregnação externa das fibras do elemento, diminuindo muito pouco a área de passagem do fluxo de ar, uma vez que 95% do volume de um elemento coalescente é formado por espaços vazios.
Por essa razão, os elementos coalescentes são descartáveis e ainda não existe um método para reciclá-los. Todavia, sua durabilidade próxima de 6000 h compensa essa limitação. Essa durabilidade está baseada no período mais econômico de utilização do elemento coalescente, quando sua maior perda de carga ainda está limitada em 0,45~0,55 bar (6~8 psi), sendo que grande parte de sua operação esteve situada na faixa média de 0,2 bar (~3 psi).

Após esse período, manter um elemento coalescente em operação torna-se muito desvantajoso do ponto de vista energético (ver tabela ΔP X custo energia, pág. 01).
Embora um elemento filtrante deva ser construído para suportar perdas de carga de até 2,5~3,0 bar, recomenda-se sua substituição com no máximo 1,0 bar, pois a perda de carga aumenta exponencialmente no final de sua vida útil, chegando rapidamente nos limites de resistência mecânica do elemento.
Por todas as razões acima, a coalescência é a forma mais econômica de separar os aerossóis de água e óleo de um sistema de ar comprimido conhecida atualmente.

Finalmente, os *filtros adsorvedores* destinam-se à remoção dos vapores de hidrocarbonetos (óleo) do fluxo de ar comprimido.
Em geral, estão posicionados depois do último filtro coalescente, pois ficam assim protegidos de qualquer contaminação na forma líqüida que poderia atingi-los.

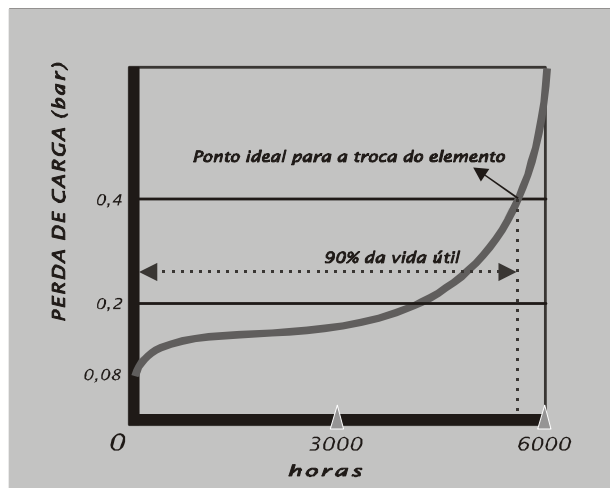
Também podem permanecer junto ao ponto-de-uso do ar comprimido, uma vez que seu uso é limitado à aplicações especiais.
O meio filtrante de um filtro adsorvedor é, via de regra, o carvão ativado, substância capaz de capturar aqueles vapores no seu interior. Embora seu processo de filtração esteja baseado no efeito da adsorção (*"atração e adesão de moléculas de gases e líqüidos na superfície de um sólido" – ISO-8573/2.3*), não se costuma realizar a regeneração/reativação do carvão ativado de um filtro adsorvedor.

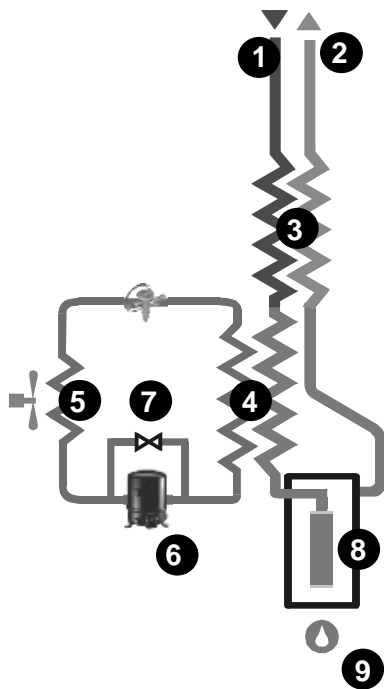
Na *especificação* de um filtro de ar comprimido, deve-se levar em consideração fatores como:
eficiência de filtração (residual de óleo, retenção de partículas, eficiência D.O.P. - ISO-8573/2.17.1), vazão, pressão e temperatura máximas admissíveis, perda de carga com elemento filtrante novo e úmido, perda de carga máxima admissível do elemento filtrante (resistência à ruptura), vida útil do elemento filtrante, normas construtivas, materiais empregados (inoxidáveis ou não), proteção anti-corrosiva da carcaça (quando aplicável), acessórios pré-instalados ou opcionais (purgador automático, manômetro diferencial, etc.), peso, dimensões, testes de desempenho e qualidade, entre outros.

O SECADOR DE AR COMPRIMIDO

Revendo o fluxograma da ISO-8573, observamos que o secador está posicionado entre o pré e o pós-filtros de ar comprimido.
Sua função é eliminar a umidade (líqüido e vapor) do fluxo de ar.
Um secador deve estar apto a fornecer o ar comprimido com o *Ponto de Orvalho* especificado pelo usuário.
Ponto de Orvalho é a *temperatura na qual o vapor começa a condensar* (ISO-8573/2.10).
Há dois conceitos principais de secadores de ar comprimido: por *refrigeração* (cujo Ponto de Orvalho padrão é +3 ºC) e por *adsorção* (com Ponto de Orvalho mais comum de –40ºC).
Os secadores de ar comprimido possuem uma norma internacional (ISO-7183) que orienta sobre suas especificações e testes.
Esta norma faz uma importante diferenciação dos secadores em função da localização geográfica dos mesmos. Faixas de temperatura de operação mais altas são definidas para equipamentos instalados em regiões mais quentes do planeta, exigindo uma adaptação dos mesmos a condições mais adversas.

O SECADOR POR REFRIGERAÇÃO

O secador por refrigeração opera resfriando o ar comprimido até temperaturas próximas a 0 ºC, quando é possível obter-se a máxima condensação dos vapores de água e óleo (sem o risco de congelamento).
Na maioria dos modelos, um circuito frigorífico (compressor, gás, condensador, válvula de expansão e evaporador) realiza essa tarefa.

No ponto mais frio do sistema, é importante uma eficiente separação dos condensados formados, evitando sua reentrada no fluxo de ar comprimido.

Dependendo do tipo de secador, isso é feito por separadores de condensado, filtros coalescentes e purgadores automáticos.

Depois de removido o condensado, a maioria dos secadores por refrigeração reaquece o ar comprimido (através do recuperador de calor, que reaproveita o calor do próprio ar comprimido na entrada do secador), devolvendo-o ao sistema numa condição mais adequada ao uso.

Ao entrar no secador, recomenda-se que o ar comprimido esteja numa temperatura próxima à ambiente, permitindo uma redução no consumo de energia do equipamento.

Se o secador for resfriado a ar, deve-se ter um cuidado especial com a temperatura ambiente onde será instalado.

Tabelas de correção são usuais para dimensionar o correto secador por refrigeração em função das condições de operação.

Em termos construtivos, um secador de ar por refrigeração é composto por trocadores de calor, um circuito frigorífico, separador de condensado, filtro coalescente, purgador automático, painel elétrico e outros itens, podendo ser resfriado pelo ar ambiente ou por água.

1 – Entrada do Ar Comprimido
2 – Saída do Ar Comprimido
3 – Recuperador de calor
4 – Evaporador
5 – Condensador
6 – Compressor Frigorífico
7 – Circuito de Refrigeração
8 – Sep. de Condensados/Filtro Coalescente
9 – Purgador Automático

O SECADOR POR ADSORÇÃO

O *secador por adsorção* caracteriza-se por remover os vapores do ar comprimido sem condensá-los.

Devido ao baixo Ponto de Orvalho que conseguem proporcionar (até –100ºC), são indicados para aplicações muito especiais, quando o secador por refrigeração deixa de ser eficaz.

Também em função de seu baixo Ponto de Orvalho, consomem muito mais energia do que os secadores por refrigeração, recomendando cautela na sua especificação.

A adsorção, como já foi mostrado anteriormente, é o efeito de atração das moléculas de gases e líqüidos para a superfície de um sólido (material adsorvedor), mantendo-as aderidas na mesma.

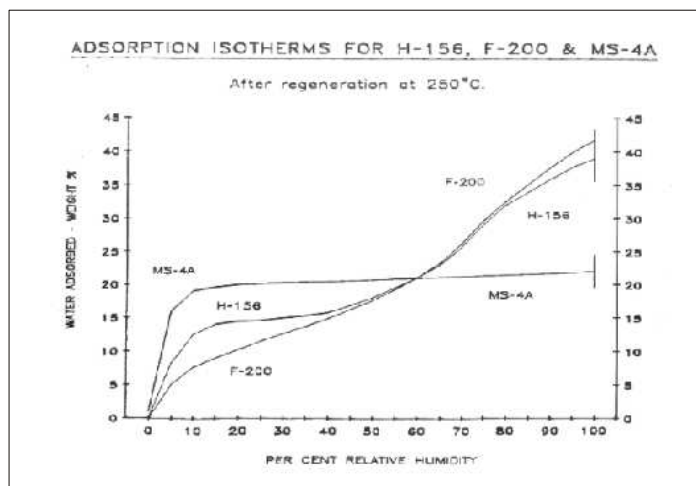
Trata-se de um fenômeno físico-químico de fácil compreensão: é similar ao efeito de molharmos uma toalha quando secamos nosso corpo após o banho.

As moléculas de água preferem ficar retidas nas fibras da toalha do que sobre nossa pele.

Mesmo úmida, a toalha permanece toalha e a água também não deixa de ser água.

Exposta ao calor, a toalha libera a água e volta a possuir sua capacidade original de reter água (regenera-se).

Da mesma forma, o material adsorvedor de um secador por adsorção tem um altíssimo poder de atração e retenção das moléculas de água sobre sua superfície.

Há diversos tipos de materiais adsorvedores (sílica-gel, alumina ativada, molecular sieve, H-156, etc.), cada um com características mais apropriadas a certos tipos de aplicação.

A superfície dos materiais adsor-vedores atingem áreas de 300 m² por grama.

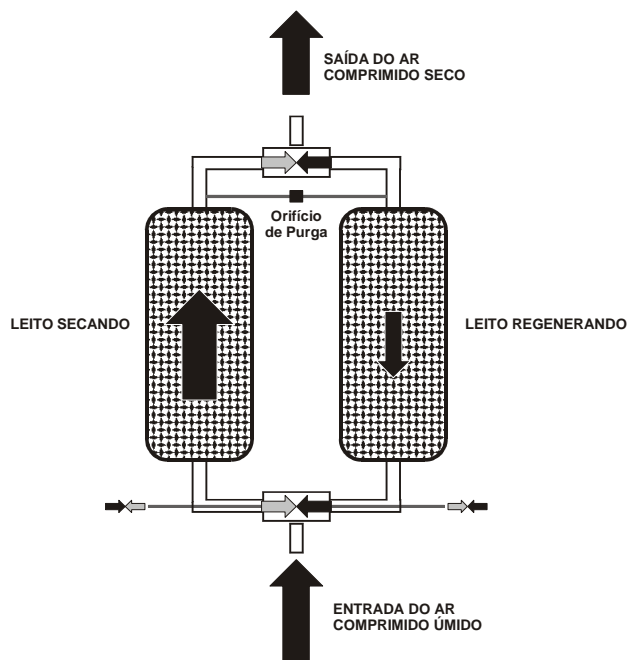
O gráfico ao lado exibe o desempenho de diferentes tipos de materiais adsorvedores em função da umidade relativa.

Alguns secadores por adsorção utilizam mais do que um tipo de material adsorvedor em seu leito de secagem, a fim de garantir o ponto de orvalho especificado.

Em geral, um secador por adsorção possui dois leitos de secagem, de modo a permitir que um leito esteja secando o ar comprimido, enquanto que o leito já saturado possa ser regenerado/reativado.

Em qualquer tipo de secador por adsorção, um fluxo de ar despressurizado e extremamente seco (pré-aquecido ou não) é o veículo condutor para a extração das moléculas de água do leito saturado no sentido oposto ao da secagem.

Um painel de comando determina a freqüência e a amplitude dos ciclos de regeneração e adsorção deste tipo de secador.

Um sistema de válvulas também comandado pelo painel do secador permite que a umidade deixe o leito saturado para o meio-ambiente.

Os secadores por adsorção subdividem-se pelo tipo de regeneração:

Tipo	Operação	Ar de regeneração	Fonte externa de calor	Custo de manutenção	Vida do material adsorvedor
Heaterless	Utiliza apenas o calor gerado na adsorção (processo exotérmico) para aquecer e regenerar o material adsorvedor do leito saturado. Consome bastante do próprio ar comprimido para esta tarefa.	15%	Não	Muito baixo	5 ~ 10 anos
Vacuum Assisted	É similar ao Heaterless, mas possui uma bomba de vácuo que reduz a contra-pressão exercida pela atmosfera, neutralizando as forças de atração/adesão do material adsorvedor. Assim, é possível consumir pouco ar comprimido para a regeneração, mas gasta energia para gerar o vácuo.	1% a 2%	Não	Baixo	5 ~ 10 anos
Internally Heated	Possui uma resistência interna (elétrica ou a vapor) que aquece o leito saturado até a temperatura de regeneração, quando um pequeno fluxo de ar encarrega-se da purga. Se a resistência for usada apenas para aquecer o ar de regeneração, haverá a necessidade de um maior consumo de ar.	1% a 8%	Sim	Baixo	3 ~ 5 anos
Externally Heated	O fluxo de ar de regeneração é aquecido por uma resistência externa aos leitos/torres do secador. Há perdas significativas de calor para o meio-ambiente, obrigando um maior consumo de ar de regeneração, mas pode-se utilizar apenas uma resistência para os dois leitos e a manutenção fica simplificada.	8%	Sim	Baixo	3 ~ 5 anos
Blower Purge	É similar ao Externally Heated, mas possui um soprador que capta o ar ambiente, aquece-o e direciona-o ao leito a ser regenerado, eliminando o consumo de ar comprimido como ar de regeneração.	Zero	Sim	Médio	3 ~ 5 anos

Em pequenas e médias vazões (até 3000 m³/h) e sempre que haja disponibilidade de ar comprimido para regeneração, os secadores por adsorção Heaterless mostram-se mais indicados.

Quando o ar comprimido de regeneração torna-se mais escasso, seu substituto preferencial é o tipo Vacuum Assisted.

Entretanto, em altas vazões, o custo do ar comprimido para a regeneração passa a justificar a adoção dos secadores por adsorção com uma fonte auxiliar de calor.

Em termos construtivos, um secador por adsorção possui dois vasos sob pressão (leitos) verticais, base, tubulação de interligação, sistema de válvulas, silenciador de purga (muffler) e um painel de comando.

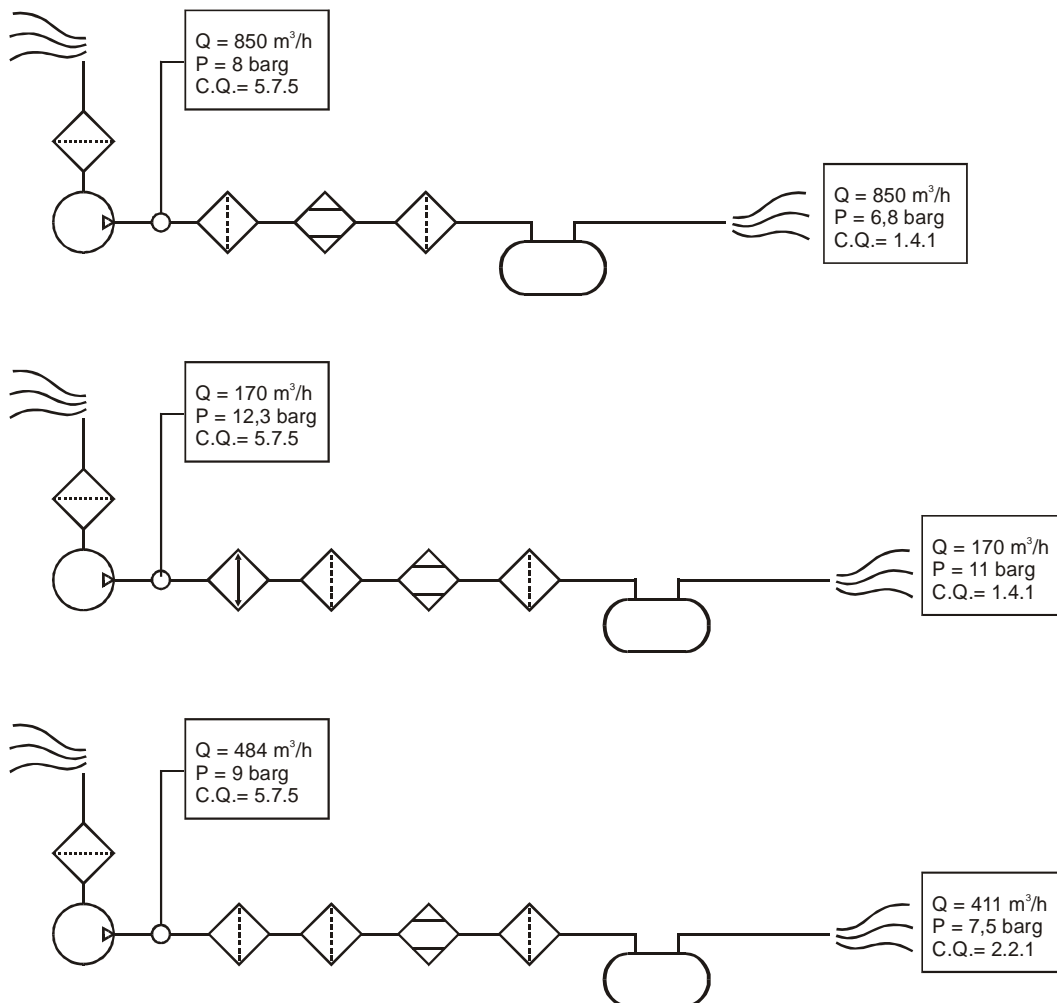
Na *especificação* de um secador de ar comprimido (refrigeração/adsorção), deve-se levar em consideração fatores como: vazão, pressão e temperatura máximas admissíveis, perda de carga, ponto de orvalho, materiais empregados (inoxidáveis ou não), energia consumida, tipo e proteção dos componentes elétricos, conceito dos sistemas de separação de condensado (quando aplicável), acessórios disponíveis, peso, dimensões, normas construtivas (ASME, ISO, UL, etc.) normas de referência e especificação (ISO-7183, Protocolo de Montreal, etc.), testes de desempenho e qualidade, entre outros.

5. CONCLUSÃO

Um sistema completo de tratamento de ar comprimido pode envolver a instalação de diversos equipamentos, cada um com características específicas.

Ao selecionar estes equipamentos, todos os aspectos acima discutidos devem ser analisados com cuidado, principalmente aqueles que envolvem *perdas de energia* (pressão, vazão, calor, etc.).

O quadro a seguir apresenta um exemplo de três diferentes sistemas de tratamento de ar comprimido.

Verifique as condições do ar comprimido antes e depois do tratamento e observe as diferenças de pressão, vazão e temperatura ocorridas.

6. BIBLIOGRAFIA

- International Standard ISO-8573-1- First edition 1991-12-15
  Compressed air for general use
  Part 1: contaminants and quality classes
- International Standard ISO-7183 - First edition 1986-03-15
  Compressed air dryers – Specifications and testing
- Occupational Safety and Health Standard (07-01-1999)
  OSHA 1910.134: respiratory protection
- Compresed Air and Gas Handbook / CAGI
  John P. Rollins, editor – Fifth edition – 1989
- Quality Standard for Instrument Air / Instrument Society of America
  ISA-S7.3 – 1975 (R1981)
- Pneumatic Fluid Power – Compressed Air Dryers – Methods for rating and testing
  NFPA/T3.27.3M R1-1981
- Humidity of Compressed Air, Industrial and Engineering Chemistry
  E. M. Landsbaun, W. S. Dodds and L. F. Stutzman – Jan. 1955
- Erosion by liquids, Machine Design
  F. J. Heymann – Dec. 10, 1970
- Gas-Phase Adsorption, Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers
  Philip A. Schweitzer, Section 3.1, McGraw-Hill
- Critical Thickness of Surface Film in Boundary Lubrication, Journal of Applied Mechanics
  I-Ming Feng and C. M. Chang – Sep. 1956
- High Speed Impact Between a Liquid Drop and a Solid Surface, Journal of Applied Physics, vol.40, n. 13
  F. J. Heymann – 1969